

**Roman MAREK<sup>1</sup>, Josef ALDORF<sup>2</sup>**

**VLIV KVALITY HORNINOVÉHO PROSTŘEDÍ NA VÝVOJ POSUNŮ VÝLOMU TUNELU**

**INFLUENCE OF QUALITY GEOLOGICAL ENVIRONMENT ON THE DEVELOPMENT OF DISPLACEMENTS OF THE TUNNEL EXCAVATION.**

**Abstrakt**

V příspěvku je řešena problematika prostorového vývoje posunů a tzv. směrových úhlů výlomu tunelu v závislosti na charakteru horninového prostředí a anomáliích, které ovlivňují napětí-deformační stav v masivu. V první části je ukázán alternativní způsob vyhodnocení naměřených posunů z konkrétního tunelu pomocí směrových úhlů. V druhé části jsou prezentovány výsledky matematické analýzy odlišnosti prostorového vývoje posunů v homogenním prostředí oproti vývojem posunů v prostředí s přítomností nehomogenity.

**Klíčová slova**

Tunel, výlom, posuny, směrové úhly, metoda konečných prvků, nehomogenita.

**Abstract**

The article dealt with the problem of spatial development of displacements and so-called directional angles of tunnel excavation in dependence on rock mass quality and its anomalies, which affect stress – deformation conditions of rock mass. The first part is pointing to alternative way of evaluation of measured displacements obtained by using directional angles in existing tunnel. The second part presents results of mathematical analysis differences of spatial displacements development in homogenous surroundings in opposite to spatial displacements development in surroundings with the occurrence of inhomogeneities.

**Keywords**

Tunnel, excavation, displacements, directional angles, finite elements method, inhomogeneity.

## **1 ÚVOD**

Geotechnický monitoring je jednou ze základních zásad Nové rakouské tunelovací metody (NRTM). Nedílnou součástí technologických postupů ražby tunelů touto tunelovací metodou se stalo sledování chování výlomu. Monitoring posunů, případně konvergencí primárního ostění, stojí v čele tohoto sledování. Vývoj posunů při ražbě tunelu lze za určitých okolností využít nejen k potvrzení předpokladů geotechnického průzkumu, ale i k predikci kvalitativní změny obklopujícího prostředí.

V článku je prezentována metodika využití prostorového vývoje posunů k predikci změny kvality prostředí pomocí tzv. směrových úhlů. Článek se odkazuje na disertační práci (Marek 2012),

---

<sup>1</sup> Ing. Roman Marek, Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 362, e-mail: roman.marek@vsb.cz.

<sup>2</sup> prof. Ing. Josef Aldorf, DrSc., Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 944, e-mail: josef.aldorf@vsb.cz.

jež byla ideově inspirována postupy rakouských odborníků v čele s Prof. Schubertem (např. Schubert, Steindorfer 1996).

V první části článku je popsán alternativní způsob vyhodnocení naměřených posunů z tunelu Klimkovice pomocí směrových úhlů. Na tomto příkladu je ukázán charakteristický vývoj posunů a směrových úhlů v závislosti na změně geotechnických parametrů okolního prostředí. Cílem je ukázat praktické využití alternativního způsobu vyhodnocování vývoje posunů pomocí směrových úhlů k predikci změny geologie v okolí výlomu tunelu. V druhé části jsou prezentovány výsledky modelové analýzy vlivu změny geologie na prostorový vývoj posunů výlomu tunelu a na charakteristický vývoj směrových úhlů z nich stanovených. Na základě 3D modelování tunelu je sledován charakteristický vývoj posunů v různých, z hlediska geologického, homogenních a stejnorodých prostředích. Jsou zde popsány základní předpoklady o velikostech a směrech posunů a směrových úhlů. Následně je pak simulováno geologicky odlišné předpolí výlomu tunelu a je sledována změna ve vývoji posunů a směrových úhlů. Cílem je na základě odlišného vývoje směrových úhlů a podélných posunů od „normálu“ predikovat změnu kvality prostředí v předpolí, případně jaký charakter toto prostředí bude mít.

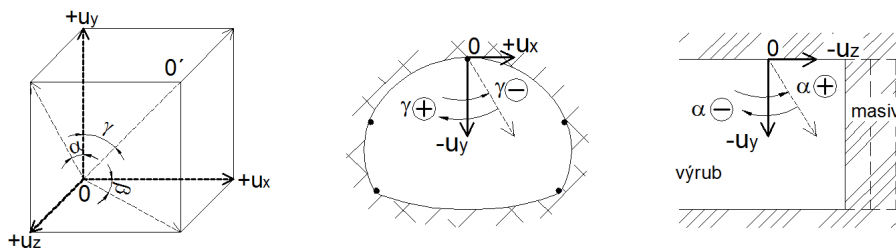
## 2 SYSTEMATIKA VYHODNOCOVÁNÍ POSUNŮ

Nejčastější metodou observace přetváření výlomu tunelu je sledování posunů stabilizovaných bodů na primárním ostění. Na základě měření jsou stanovovány absolutní polohové změny měřických bodů v trojrozměrném souřadném systému. Výsledky měření jsou kontinuálně vyhodnocovány ve formě číselných a grafických výstupů, kde hlavními sledovanými parametry jsou časové vývoje velikostí posunů ve směrech hlavních os tunelu  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Velikosti posunů jsou často doplněny grafy vývoje vektorového diagramu v rovině měřeného profilu, které znázorňují směrový progres sledovaných bodů.

Ne vždy však jsou velikosti a změny směrů posunů tak velké, aby bylo možné ihned vysledovat určitou progresi v jejich vývoji. U havarijních stavů často bývá nárůst posunů velmi rychlý, bez předchozího náznaku změny směru. Změna geologického charakteru horninového prostředí zase nemusí mít výraznou odezvu ve změně velikosti a směrech posunů vůbec, zvláště pak u posunů rovnoběžných s podélnou osou tunelu. Proto se v posledních letech pro potřeby predikce kvality prostředí vyvíjejí nové postupy vyhodnocování naměřených posunů, které mohou upřesnit obraz o jeho charakteru. Jednou z možností je již zmíněné sledování vývoje přetváření výlomu pomocí tzv. „směrových úhlů“.

Základní myšlenka spočívá v definici úhlů, které svírají výslednice posunů v hlavních rovinách tunelu s hlavními směry posunů v příslušném kvadrantu. Kvadrant je závislý na znaménkové konvenci (obr. 1). V souřadném systému  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , kde osy  $x$  a  $y$  jsou kolmé k podélné ose tunelu a osa  $z$  je kolmá k nim, tzn. je rovnoběžná s podélnou osou liniového díla, bude znaménková konvence následující:

- osa  $x$  – posuny  $u_x$  [mm] – kladný směr z leva doprava (příčné posuny)
- osa  $y$  – posuny  $u_y$  [mm] – kladný směr zdola nahoru (svislé posuny)
- osa  $z$  – posuny  $u_z$  [mm] – kladný směr od čelby do výrubu (podélné posuny)



Obr. 1: Orientace posunů a směrových úhlů

Velikost směrových úhlů je pak dána:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{u_z}{u_y}, \quad \operatorname{tg} \beta = \frac{u_z}{u_x}, \quad \operatorname{tg} \gamma = \frac{u_x}{u_y} \quad (1)$$

Jmenovatelé vztahů uvedených v (1)  $\neq 0$ . Jejich hodnota nemůže reálně nabývat velikosti „0“, ale velikost naměřených nebo vypočtených posunů nulová být může. V takovémto případě je nutné velikost úhlu aproximovat z tendence vývoje posunů předchozích a následujících. Praktické použití systematiky směrových úhlů a její srovnání s tradičním vyhodnocováním vývoje posunů je v další části článku.

### 3 VYHODNOCOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH POSUNŮ Z TUNELU KLIMKOVICE

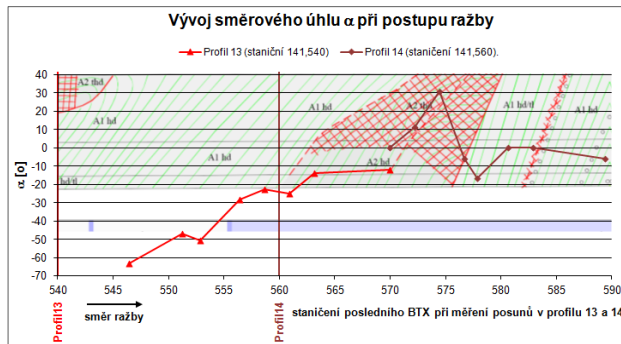
Dálniční tunel Klimkovice, uvedený do provozu 6. 5. 2008, je součástí dálnice D1 a nachází se nedaleko stejnojmenné obce, v úseku Bílovec - Ostrava. Tunel se skládá ze dvou tubusů, které obsahují dva jízdní pruhy. Tubus A ve směru Brno-Ostrava má délku cca 1 076,83 metrů, tubus B, v opačném směru, je dlouhý 1 088,09 m. Samotná jeho ražba probíhala NRTM, z největší části s horizontálním členěním výrubu (kalota-opěří-dno). Průměrná plocha výrubu je 120,17 m<sup>2</sup>, z toho kaloty cca 56 m<sup>2</sup>. V ražených úsecích je primární ostění realizováno ze stříkaného betonu třídy C20/25 o minimální tloušťce 240 mm, klasicky vyztuženého KARI sítěmi a příhradovými nosníky (BTX) a doplněno horninovými svorníky. Sekundární železobetonové ostění z betonu C30/37 má tloušťku minimálně 350 mm, v protiklenbě pak až 1 200 mm.

Díky přítomnosti nedalekého lázeňského centra a předpokládané složité geologii byl před samotnou ražbou tunelu Klimkovice proveden rozsáhlý geotechnický průzkum, který byl po celou dobu ražby upřesňován a doplňován geotechnickým monitoringem. Z tohoto důvodu jsou současné geologické a hydrogeologické poměry v této oblasti detailně prozkoumány. Maximální mocnost nadloží tunelu je 31 m. Tunel byl realizován ve skalních až poloskalních horninách flyšových souvrství s různými stupni zvětrání, které jsou tvořeny převážně jílovci a prachovci, dále pak drobami a pískovci. Kvartérní pokryv tvoří hlavně sedimenty jemnozrnných zemin, místy se vyskytují zeminy tříd G3-G4. Podzemní voda se vyskytovala většinou až ve zvětralé povrchové vrstvě skalního masivu nebo v jeho puklinách a její proudění záviselo na dotacích z povrchových vrstev.

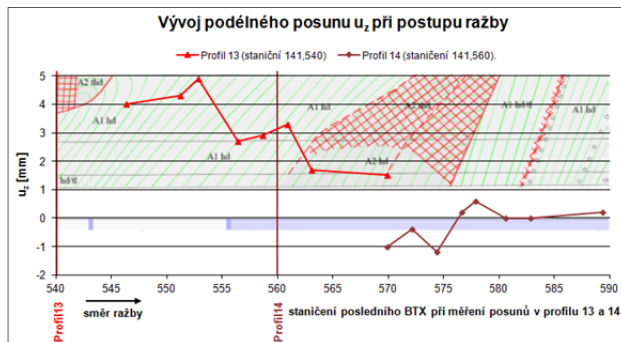
Na ilustračních výstupech z monitoringu posunů primárního ostění tubusu B, tunelu Klimkovice jsou ukázány typické vývoje posunů a především směrových úhlů. S ohledem na dostupná data a zaměření studie jsou analyzovány pouze posuny ve směru podélné osy díla (dle předchozí definice  $u_z$ ) a směrové úhly  $\alpha$ . Podkladem jsou data ze závěrečné zprávy II. etapy inženýrskogeologického a geotechnického průzkumu vypracované firmou GEOTest Brno a.s. a z geotechnického monitoringu realizovaného firmou SG-Geotechnika a.s. V průběhu ražby byly sledovány posuny v měřických profilech, které byly od sebe vzdáleny zpravidla 20 m. Měření probíhala po dobu prvních sedmi dnů od osazení měřických bodů co den, následně pak co tři dny do ustálení vývoje posunů. V našem případě je věnována pozornost posunům ve vrcholu tunelové trouby B, a to po dobu prvních 10 dnů od osazení měřických bodů záměrnými terčíky. Za toto období se čelba od měřického profilu posunula v průměru o 25 metrů. Při řešení výše nastolené otázky je vycházeno z podélného geologického řezu v ose tunelové trouby B, jenž shrnuje geologii ověřenou ze samotné ražby. Detailněji jsou zpracovány některé charakteristické úseky, kdy čelba projde nebo prošla zónou porušení (prostředím s kvalitativně horšími vlastnostmi) a vývoj sledovaných charakteristik je porovnán s případem průchodu čelby úsekem s relativně konstantní geologií.

V grafech 1 až 5 jsou znázorněny vývoje směrových úhlů  $\alpha$  a posunů  $u_z$  v příslušných měřických profilech, při postupu ražby, ve třech různých úsecích které jsou charakteristické svojí geologickou skladbou. Ta je zobrazena spolu s vodonosností v pozadí každého grafu. Konkrétně v grafu 1 je znázorněn vývoj směrových úhlů  $\alpha$  v profilech 13 a 14 vzdálených 223,613 m a 243,613 m od brněnského portálu. Z grafu vyplývá, že měřický profil 13 (staničení 141,540 km) se nachází něco přes 20 metrů od oblasti s výraznou tektonikou, která ovlivňuje v tomto měřickém profilu vývoj směrových úhlů. Z tohoto pohledu je možné s přibližováním čelby k zóně porušení sledovat výraznou

tendenci změny úhlu  $\alpha$  směrem k ní. V profilu 14 (staničení 141,56 km), ve kterém první měření posunů proběhla skoro s 10-ti metrovým odstupem čelby, je možné v počáteční fázi měření sledovat tu samou vývojovou tendenci, která se však po průchodu čelby tektonizovanou zónou začíná obracet. V závěrečné fázi ještě reagují měření v profilu 14 na tenkou tektonickou linii ve staničení cca 141,582 km. Pro ucelení představy o vývoji směru a velikosti posunů  $u_z$  v profilech 13 a 14 je v grafu 2 vykreslen jejich průběh, opět v závislosti na vzdálenosti čelby od měřických profilů.

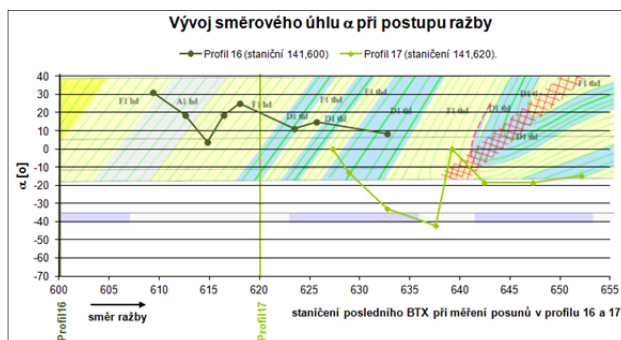


Graf 1: Vývoj směrového úhlu  $\alpha$  – úsek 1



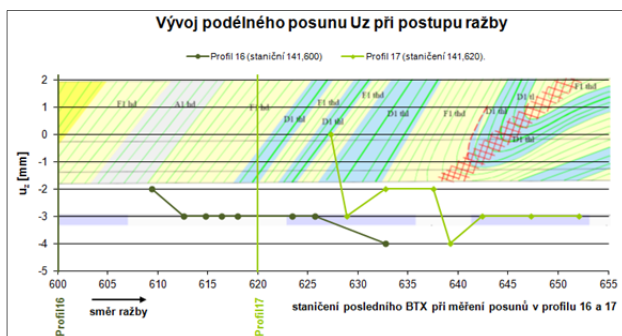
Graf 2: Vývoj podélného posunu  $u_z$  – úsek 1

Opačný případ vývoje směrového úhlu  $\alpha$  vlivem geologie je znázorněn v grafu 3. Úhly vycházející z naměřených dat v profilu 16 reagují na vrstevnatost prostředí a spíše indikují prostředí s kvalitativně lepšími vlastnostmi, což se odráží i v následujícím měřickém profilu 17, v prvních čtyřech měřeních. Následně ale dochází k obrácení tendence vývoje, což je možné přisoudit přítomnosti tektonicky narušené vrstvy. S dalším postupem čelby od měřického profilu 17 pak dochází opět k ustálení vývoje směrových úhlů a posunů ve sledovaném bodě.



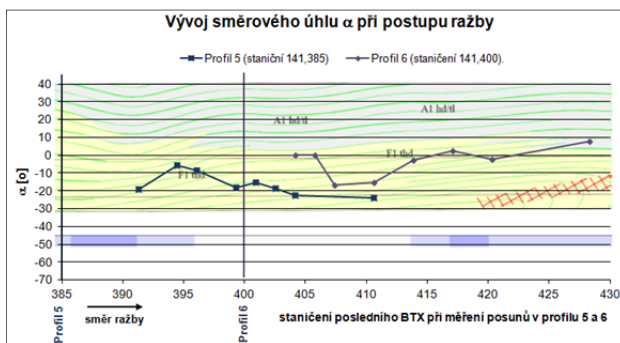
Graf 3: Vývoj směrového úhlu  $\alpha$  – úsek 2

Z podélných posunů v měřickém profilu 16 a 17 je složitější stanovit jednoznačný závěr o geologii v předpolí, jak je vidět v grafu 4. Z velikosti a vývoje je však možné si představu o předpolí ražby udělat.



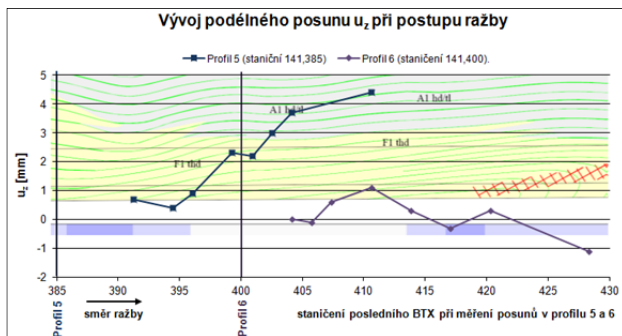
Graf 4: Vývoj podélného posunu  $u_z$  – úsek 2

Vliv relativně konstantní geologie s podélnou vrstevnatostí na vývoj úhlu  $\alpha$  je zobrazen v grafu 5. Rozsah hodnot v měřickém profilu 5 při ražbě nepřesáhl  $20^\circ$ . Takováto tendence je pro tento případ typická.



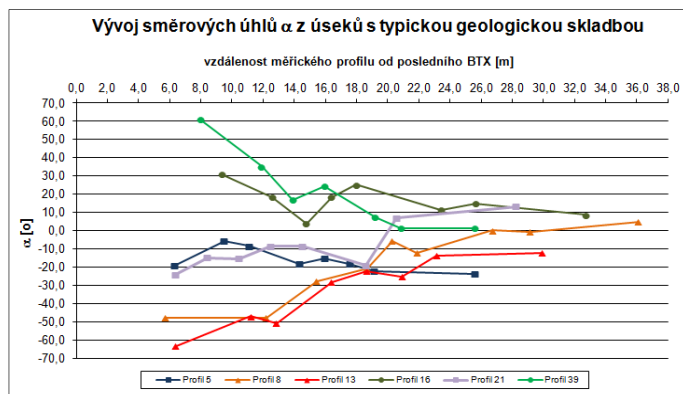
Graf 5: Vývoj směrového úhlu  $\alpha$  – úsek 3

V grafu 6 je opět znázorněn vývoj podélných posunů v profilech 5 a 6, opět při postupu čelby od nich. Stejně jako tomu bylo v předchozích případech, je značně problematické z jejich vývoje vyvozovat nějaké závěry o tektonice nebo kvalitě okolním masivu. Důležitý je hlavně jejich směr a maximální přípustná hodnota pro stanovení varovných stavů.



Graf 6: Vývoj podélného posunu  $u_z$  – úsek 3

Zajímavé je srovnání vývoje směrových úhlů  $\alpha$  v grafu 7, ve kterém jsou vykresleny současně předchozí příklady doplněné o další profily z úseků s typickou geologickou skladbou. Vývoje úhlů  $\alpha$  jsou vyneseny v závislosti na vzdálenosti měřického profilu od posledního příhradového rámu BTX.



Graf 7: Srovnání vývoje směrových úhlů  $\alpha$

Z jednotlivých průběhů je patrný typický sklon křivek pro konkrétní geotechnické poměry v předpolí ražby. Profily 16 a 39 se nacházejí před prostředím s lepšími geotechnickými poměry, profily 8 a 13 před prostředím s horšími geotechnickými poměry a profily 5 a 21 reprezentují vývoje směrových úhlů  $\alpha$  v profilech nacházejících se v oblastech s konstantní geologickou skladbou. Z výsledků je také možné také konstatovat, že výraznější vývoj směrového úhlu  $\alpha$  je do vzdálenosti cca 25 m od čelby, což odpovídá něco kolem dvou až troj násobku šířky kaloty. Ve větší vzdálenosti měřického profilu od čelby byl vliv geologie na vývoje úhlů  $\alpha$  i posunů  $u_z$  zanedbatelný.

#### 4 MODELOVÁ ANALÝZA

V současnosti se nejčastěji pro řešení složitých prostorových úloh vlivu ražby podzemního díla na napěťo-deformační stav v masivu využívá matematického modelování. Z různých teorií se pro řešení úloh interakce podzemních konstrukcí s horninovým prostředím ukázala jako nejpoužitelnější numerická metoda konečných prvků, a to především díky své univerzálnosti a menší náročnosti na volbu výpočtových funkcí.

Jako podklad pro parametrické výpočty posloužila kalota jednoho tubusu tunelu Klimkovice. Její geometrie, stejně jako plocha čelby, vychází ze vzorového příčného řezu z projektové dokumentace. Celkové minimální horizontální a vertikální rozměry modelu respektují doporučení výrobce programového systému MIDAS GTS-3D, který byl pro tvorbu numerického modelu použit. Modelová výška nadloží je konstantně 30 metrů a je volena s ohledem na charakter parametrických výpočtů a skutečnou maximální mocnost nadloží tunelu Klimkovice.

Pro modelování chování výztuže je použit lineárně-pružný konstitutivní model, nelineární chování horninového materiálu je simulováno Mohr-Coulombovým pružně-ideálním plastickým konstitutivním modelem. Samotné velikosti materiálových charakteristik pro parametrické výpočty vychází částečně ze skutečných vlastností horninového prostředí a požadovaných vlastností primární výztuže specifikovaných v technické zprávě RDS Klimkovického tunelu, částečně ze zkušenosti a literatury (Klepsatel a kol., 2003) a (Turček, Hulla, 2004) a částečně z předchozích výpočtů prováděných v rámci diplomové práce (Marek, 2005).

Primární ostění uvažované jako skořepina ze stříkaného betonu (SB) má v modelu tloušťku  $h_c = 0,24$  m, což je minimální hodnota požadovaná pro realizaci Klimkovického tunelu v technické zprávě. Velikost modulu pružnosti je zvolena  $E_c = 17\,000$  MPa. Přibližně této hodnoty by měl SB dosáhnout po 10 dnech (dle Klepsatel a kol., 2003), jež je obdobím, které je pro reálné vyhodnocení vlivu změny geologie na vývoj posunů nejdůležitější. Zároveň tato jednotná vyšší velikost, společně s koeficientem přenosu zatížení horninovým prostředím, nahrazuje svorníky, o které je model ochuzen z důvodu zjednodušení. Poissonovo číslo je standardních  $\nu_c = 0,2$ . Objemová tíha je uvažována  $\gamma_c = 24$  kN/m<sup>3</sup>. Koeficient přenosu zatížení je z výše zmíněného přijat 0,3 : 0,7, tzn. nevyztužený výlom přenáší 30% zatížení, vyztužený výlom pak 70% zatížení.

Materiálové charakteristiky horninového prostředí jsou voleny tak, aby svými velikostmi částečně odpovídaly skutečné geologii v okolí Klimkovického tunelu, zároveň jsou však voleny tak, aby výsledky parametrických výpočtů byly dostatečně vypovídající a bylo z nich možné vyvodit relevantní závěry. V modelu je uvažováno se čtyřmi typy horninových materiálů, zastupujících různé kvality prostředí. Označeny jsou R2, R3, R5 a R6 a jejich parametry jsou uvedeny v tab. 1. Vlastnostmi odpovídají skalním a poloskalním horninám nižších pevností a vyššího stupně porušení. Materiál s označením R6 spadá svými přetvárnými a pevnostními vlastnostmi do velmi porušených poloskalních hornin úlomkovitého charakteru, případně do zemin typu štěrků. Vliv vody není v modelech uvažován.

Tab. 1: Materiálové parametry uvažovaných typů hornin

	E [kPa]	$\sigma_c$ [kPa]	$\nu$	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	c [kPa]	$\phi$ [°]
R2	500000	1500	0,2	24	200	50
R3	250000	495	0,25	23	55	45
R5	125000	155	0,25	22	15	40
R6	65000	-	0,32	21	2	35

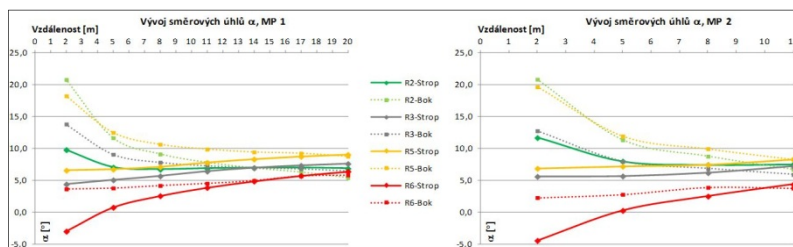
Referenčním modelem je numerický model 1. Je v něm simulována ražba v homogenním prostředí, které má vlastnosti jednotlivých typů materiálů z tab. 1. Cílem je stanovit základní velikosti a tendence vývoje posunů a směrových úhlů, se kterými jsou následně porovnávány výsledky z dalších modelů.

Ražba tunelu je simulována, stejně jako v dalších modelech, po zabírkách, s postupným vyztužováním, kdy fázi výlomu následuje fáze vyztužování. Přetváření výlomu je sledováno ve dvou měřických profilech, v jednotlivých fázích ražby a vyztužování. Vzdálenost čelby od měřického profilu MP 1 se postupně mění od 2 do 20 m, resp. od 2 do 11 m u MP 2. Velikosti a vývoje posunů a směrových úhlů jsou vyhodnocovány z pohledu vzdalující se čelby od měřických profilů. V modelech 2, 3 a 4 se vzdalující čelba bude současně přibližovat k nehomogenitám.

Z referenčních modelů vyplývá, že pro měřické body ve stropě a v bocích tunelu, kdy body v bocích jsou cca 1,5 m pod stropem, mají svislé posuny očekávaný směr a řádově předpokládané velikosti. Nejmenší svislé posuny jsou v nejkvalitnějším prostředí (5 mm), největší posuny, z pohledu kvalitativního, v nejhorším prostředí (až 50 mm). V MP 2 navíc nedocházelo k ustálení posunů.

U podélných posunů v měřických bodech nacházejících se ve stropě byla vývojová tendence směrem k čelbě. Je to dáno volnou plochou čelby kaloty. Velikost se se vzdalováním čelby od měřických profilů zvyšuje. U materiálů typu R2 a R3 je to změna v řádu 1-2 mm, u R5 a R6 až 6 mm. K jejich ustálení dojde v závislosti na kvalitě prostředí mezi 20 až 35 metry za postoupivší kalotou. Vyplývá z toho, že podélné posuny mají relativně dlouhý doznívající charakter daný opakovaným odlehčováním výlomu postupem ražby. V boku výlomu je v homogenním prostředí rozvoj posunů  $U_z$  minimální.

Vývoj směrového úhlu  $\alpha$  má v kvalitnějším horninovém prostředí jak ve stropě, tak v boku výlomu vývojovou tendenci směrem do výrubu, v horším má vývojovou tendenci opačnou - do čelby.

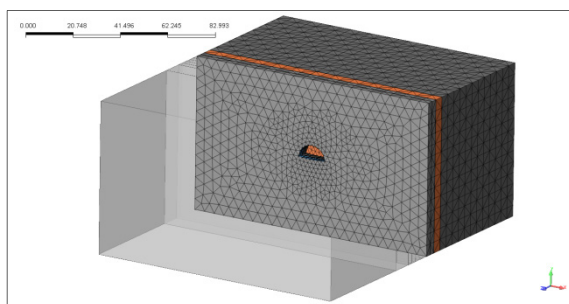


Graf 8: Srovnání vývoje směrových úhlů  $\alpha$  v různých homogenních prostředích

V numerickém modelu 2 byla simulována svislá nehomogenita, která se nachází před čelbou a výlom se k ní postupně od měřického profilu MP 1 a následně i MP 2 přibližuje. Mocnost nehomogenity je 5 metrů a je rovnoběžná s čelbou (pohled v axonometrickém zobrazení je na obr. 2).

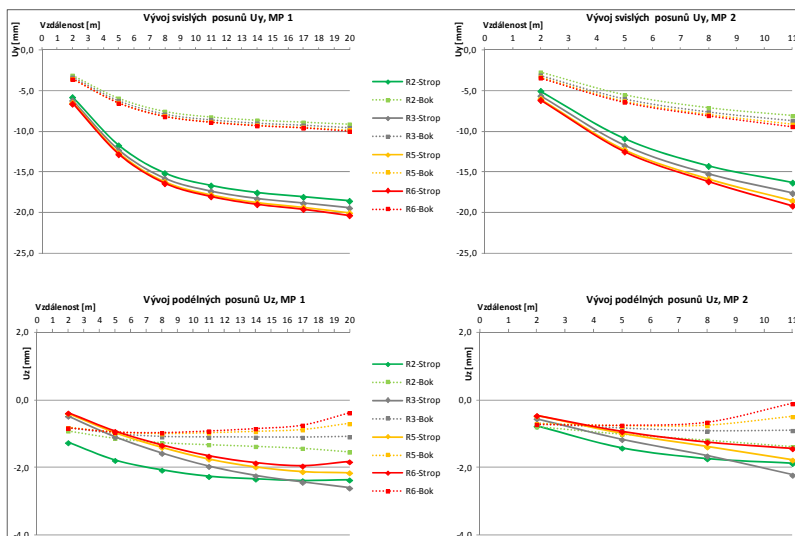


Zvoleným základním materiálem je hornina R3 a nehomogenita je tvořena materiály R2, R5 nebo R6. Snahou je zjistit, jak se změní napěťo-deformační stav, když se rážba přiblíží ke kvalitnějšímu prostředí (R2) nebo ke kvalitativně horšímu prostředí (R5 nebo R6).



Obr 2: Axonometrický pohled na schéma modelu 2

V následujících grafech je srovnání průběhu sledovaných parametrů vůči průběhu v homogenním prostředí, které je znázorněno křivkami označenými jako R3 (průběh v hornině R3 z předchozího modelu). Křivky R2, R5 a R6 označují vývoje parametrů v prostředí R3 s nehomogenitami tvořenými právě materiály R2, resp. R5 a R6.



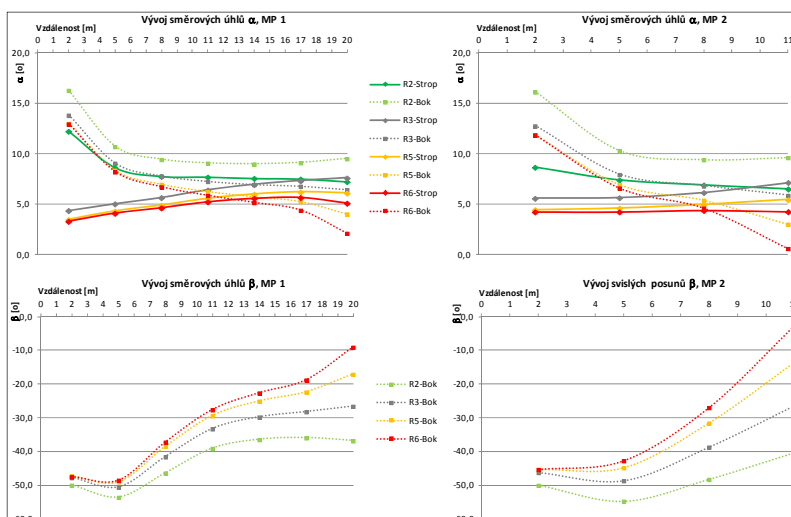
Graf 9: Srovnání vývojů posunů  $U_y$  a  $U_z$  – model 2

Z průběhů posunů  $U_y$  a  $U_z$  (graf 9) v měřických bodech ve stropě díla je patrné, že rozdíly mezi modely s materiály R3, R5 a R6 nejsou nijak zvláště výrazné. Pouze mezi R3 a R6 je u svislých posunů s přiblížováním čelby k nehomogenitě vidět výraznější difference křivek. Zajímavější je odlišný vývoj podélných posunů v prostředí s nehomogenitou R2. Z počátku je velikost posunů vyšší směrem do prostředí, ale s přiblížováním k nehomogenitě se směr otáčí. Je to dáno patrně tím, že nehomogenity s horšími vlastnostmi „tlačí“ více proti nevyraženému horninovému celiku. Po větším přiblížení výlomu k nim se ale napjatost přeskupuje směrem do volné plochy výlomu. U svislých posunů v boku díla (graf 9) jsou rozdíly ve vývojích téměř nulové, u podélných jsou patrnější, ale absolutní rozsah velikostí je velmi malý, do 2 mm.

Naproti tomu průběh směrového úhlu  $\alpha$  (graf 10) má v případě nehomogenity R2 tendenci stálou, klesající (stáčejší se od nehomogenity do výlomu), kdežto u ostatních je tomu opačně, což je velmi důležitý poznatek. Zajímavé jsou i velikosti směrových úhlů měřických bodů v bocích výlomu. Rozdíly pro různou geologickou skladbu ve směrech i velikostech jsou dosti výrazné a jsou tím větší,



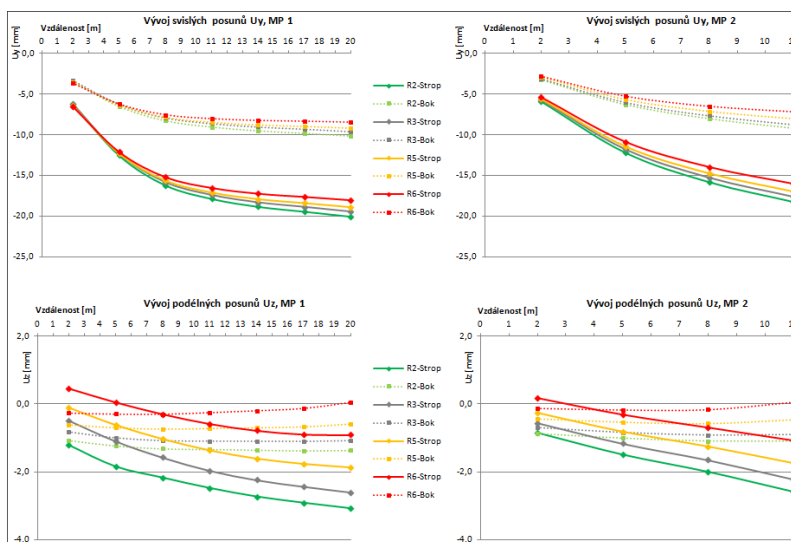
čím jsou vlastnosti nehomogenit odlišnější od základního prostředí. To platí jak pro směrové úhly  $\alpha$ , tak pro směrové úhly  $\beta$ , které svírají výslednice posunů  $U_x$ - $U_z$  se směrem daným osou x.



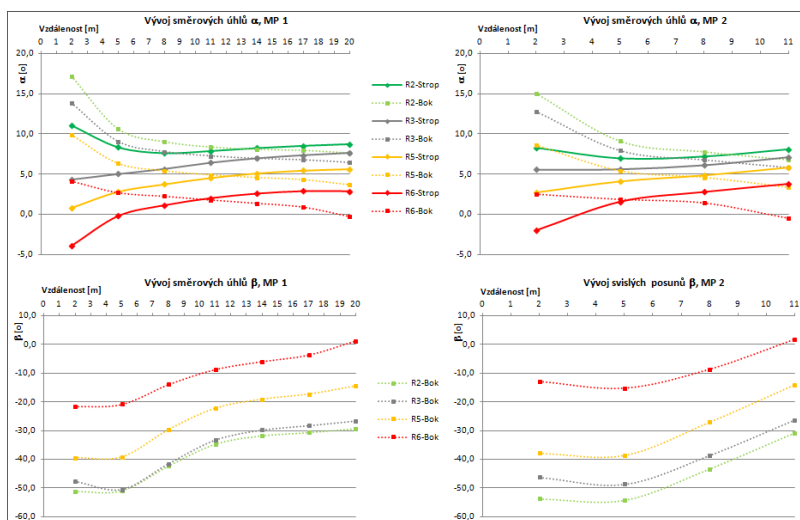
Graf 10: Srovnání vývoje směrových úhlů  $\alpha$  a  $\beta$  – model 2

V numerickém modelu 3 je opět simulována nehomogenita, která se nachází před čelbou a výlom se k ní postupně přibližuje. Její mocnost je též 5 metrů, na rozdíl od předchozího modelu má ale směrem k počvě sklon  $45^\circ$ . Stejně jako v předchozím případě jsou i typ základního prostředí a materiálů tvořících nehomogenity.

Z porovnání grafů modelu 2 a grafů modelu 3 vyplynul větší rozdíl mezi podélnými posuny  $U_z$ , kdy v modelu 3 mají posuny ve stropě i v boku díla konstantní přírůstek v závislosti na kvalitě prostředí nacházejícím se v předpolí. Větší je i samotný rozsah velikostí. Velikosti a průběhy svislých posunů jsou naproti tomu obdobné. Větší rozsah v závislosti na kvalitě předpolí vykazují také směrové úhly. Opět platí, že směrové úhly  $\alpha$  pro body ve stropě mají tendenci se více stáčet do kvalitativně horšího prostředí. Směrové úhly v bocích mají ale navíc, na rozdíl od předchozího modelu, s přibližováním k nehomogenitě odlišné kvality konstantní difference velikostí.



Graf 11: Srovnání vývoje posunů  $U_y$  a  $U_z$  – model 3



Graf 12: Srovnání vývoje směrových úhlů  $\alpha$  a  $\beta$  – model 3

Parametry numerického modelu 4 jsou zcela totožné s předchozím, pouze nehomogenita má vzhledem k čelbě opačný sklon, opět ukloněný o  $45^\circ$  od svislice, tentokrát směrem od počvy. Průběhy posunů mají obdobný charakter, jako u modelu 3, ale velikosti pro různá prostředí v předpolí mají velmi malé rozdíly, až na svislé posuny pro prostředí s nehomogenitou tvořenou materiálem R6. U tohoto je přece jen odlišnost o něco výraznější. Stejně jako u posunů je to i se směrovými úhly. Pro vývoj směrových úhlů  $\alpha$  ve stropě dila platí totéž jako u opačného sklonu nehomogenity. Rozsah hodnot je však o dosti menší.

Výsledky také potvrzují obecně známou skutečnost, že na prostorovém přetváření výlomu se projeví nejvíce nehomogenita se sklonem k počvě a nejméně se sklonem opačným, což se odráží i ve velikostech a rychlostech vývoje směrových úhlů.

## LITERATURA

- [1] MAREK, R. 2012. *Vliv kvality horninového prostředí na vývoj posunů výlomu tunelu : Disertační práce*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, Fakulta stavební, 2012. 105 s.
- [2] MAREK, R. 2005. *Vliv nehomogenit a anizotropie horninového masívu na kvantitativní a kvalitativní obraz přetváření výlomu tunelu : Diplomová práce*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, Fakulta stavební, 2005. 89 s.
- [3] KLEPSATEL, F., KUSÝ, P., MAŘÍK, L. 2003. *Výstavba tunelů ve skalních horninách*. Bratislava : Jaga group, v.o.s., 2003. 210 s., ISBN 80-88905-43-5.
- [4] SCHUBERT, W., STEINDORFER, A. 1996. Selective Displacement Monitoring during Tunnel Excavation. *Felsbau 14*, 1996, No.2. Essen : VGE, s. 93-98. ISSN 0174-6979.
- [5] TURČEK, P., HULLA, J. 2004. *Zakladanie stavieb*. Bratislava : Jaga group, v.o.s., 2004. 360 s., ISBN 80-88905-43-5.
- [6] www.barab.eu - informační (databázový) systém BARAB<sup>®</sup> vyvinutý společností ARCADIS
- [7] Závěrečná zpráva II. etapy IGP a geotechnického průzkumu. GEOtest Brno a.s, 2007.
- [8] 3D Finite Element Analysis for Geotechnical & Tunnel Analysis. *MidasGTS Training Course : 24-25 April, 2008, Prague*. European Institute of IT Education, EIITE, 2008.

## Oponentní posudek vypracoval:

Doc. Ing. Vladislav Horák, CSc., Ústav geotechniky, Fakulta stavební, VUT v Brně.

Prof. Ing. Jiří Barták, DrSc., Katedra geotechniky, Fakulta stavební, ČVUT v Praze.